

砂漣を形成する海底上の岸沖漂砂量の理論的検討

早川典生*・辻本剛三**・涌井正樹***
福島祐介****・中村由行*****

1. はじめに

近年岸沖漂砂量式としては、Madsen-Grant 型¹⁾の無次元漂砂量 ϕ が Shields 数 ϕ の 3 乗に比例する $\phi \propto \phi^3$ の型がよく用いられている。これは Einstein-Brown 公式を準定常のもとに用いて考え出されたものに他ならない。

岸沖の砂移動には大きく分けて 3 つのタイプに分類できる。① 掃流砂のみ移動、② 砂漣の形成により渦ができ、掃流砂と浮遊砂が移動、③ シートフローの状態で移動。

Madsen-Grant の式は①～③について特に区別しないで、半周期間の砂移動量を与えるだけで net 量を与えていない。野田、松原²⁾は波、底質のみで掃流砂と浮遊砂に分けて量を求めているが、①～③の移動形態について特に考慮していない。①や③については沢本、山下³⁾が移動量を算出する式を提案し、柴山、堀川⁴⁾は①～③について Madsen-Grant 型を用いて底面形状や流れの条件によって定数を変化させて移動量を求めている。

砂漣は通常の波浪条件では常に形成されていると考えられ、Nielsen⁵⁾は $\phi < 0.4$ では砂漣波長 λ 、砂漣波高 η の比 η/λ が 0.15～0.2 の一定値をとり、 $\phi > 1$ ではシートフローになるとしている。嵐の時を除けば通常 ϕ が 1 以上になるとは少ない。このように砂漣が形成されている②での移動量については、沖に向う場合については砂村、阪東、堀川⁶⁾が求めているが、砂移動を直接解析し、net の岸沖漂砂量に結びつけている研究は著者ら^{7),8)}だけである。

本報は海底には常に砂漣が形成されていることに注目し、その上を掃流砂と浮遊砂が移動している②における漂砂量を著者らの既報の成果にさらに新しい実験を加えて、Madsen-Grant 型の岸沖漂砂量公式を理論的に検討し、著者らの net の岸沖漂砂量モデルの精度を高めることを目的とする。

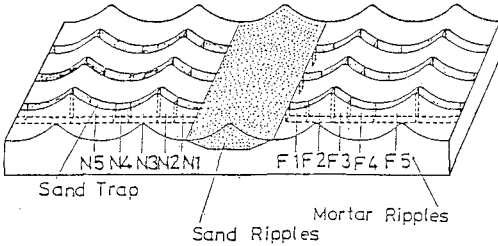
2. 実験方法と実験条件

実験は、2 次元造波水槽に中央粒径 0.023 cm の砂を長さ 2.5 m、厚さ 6 cm に敷きつめ行なった。砂粒子の動きをビデオカメラで観察し、水面波形、流速分布、浮遊砂濃度分布を測定した。漂砂量は砂面測定器で求めた。表—1 に実験条件、測定結果を示す。

また本研究では砂漣上の浮遊砂雲中の砂粒子が一波長を越えて輸送される割合を求めるために図—1 に示すような sand trap 付の人工砂漣を用いた。

表—1 実験条件

Case No.	波高 H (cm)	周期 T (sec)	波長 L (cm)	水深 h (cm)	砂漣波高 η (cm)	砂漣波長 λ (cm)	net の無次元漂砂量 $Q_{net}/w_0 \cdot d$ ($\times 10^{-2}$)
1	24.6	1.58	274	40	1.2	8.6	-0.63
2	19.8	1.66	349	50	1.5	10.0	0.46
3	13.3	1.98	328	30	1.9	11.6	-1.44



図—1 人工砂漣

3. 砂移動機構のモデル化

(1) 砂漣上の砂粒子の移動機構

砂漣上の砂粒子の移動機構は、著者らや砂村らにより詳しく観察されており、本研究でも水槽実験において同様な現象を観察した。その記述は本研究にとって重要であるので特に改めて図—2 にその概略を示す。

砂漣上の岸向きの流速が砂粒子の移動限界に達する位相において(図—2 中の流速の位相 θ_1)、砂漣頂部を越える掃流砂 B_n が発生する。この時砂漣頂部には沖側で形成された浮遊砂雲 S_{n1} が、流れにより岸側に運ばれ

* 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学教授 建設系
** 正会員 工 修 神戸市立工業高等専門学校講師 土木工学科
*** 正会員 工 修 ユニテック(株)
**** 正会員 工 博 長岡技術科学大学助教授 建設系
***** 正会員 工 修 長岡技術科学大学助手 建設系

る。岸向きの流速が最大流速に達する位相 (θ_2) において、砂漣岸側に渦 V_{n1} が形成され、砂漣頂を越えて輸送される掃流砂を取り込み (θ_3)、この時この渦は岸側斜面上から砂粒子を巻き上げ渦内に取り込む (q_{vn})。また一砂漣波長沖側で形成された浮遊砂雲 S'_{n1} が S'_{n3} となって砂漣頂部を岸側に移動していく。岸向きの流れから沖向きの流れに反転する位相 (θ_4) では、岸側斜面上の渦の発達停止後に、渦中に含まれている砂粒子の一部を沈降させる。沖向きの流れにおいても同様な砂移動を示す。

(2) 平均漂砂量の算定法

図-2 砂移動模式図において、砂村らは $B_n = B_f$, $S_{n1} = 0$, $S'_{n3} = S'_{f3}$ と仮定し、 S_{f1} を計算することにより平均漂砂量を算定している。これに対して著者らの既報⁷⁾では V_{n1} , V_{n2} , V_{f1} , V_{f2} を除いた解析を行っており、また別報⁹⁾ではこれらの項についても議論している。本報では図-2 を統一的に取り扱おうとするものである。

前述のような砂漣上の砂粒子運動の観察から、一周期平均の net の漂砂量を次のように算定した。岸向きの漂砂量 Q_n は、掃流砂 B_n 、沖側斜面上に発生する渦により形成される浮遊砂雲 S_{n1} 、一砂漣波長沖側で形成された浮遊砂雲の一部 S'_{n3} との和で表わされる。浮遊砂雲として輸送される砂粒子の量は、以下のような仮定により求める。砂漣斜面上に形成された渦は、砂漣頂より放出される掃流砂を効率 ε で取り込み、斜面上からも砂粒子を巻き上げて、浮遊砂雲を形成し、一砂漣波長を移動する

間に、 k_n , k_f の割合で砂が沈降し、 S_{n1} , S_{f1} を形成する。 ε としては砂漣頂を横切る渦度束を渦が取り込む割合、vorticity fraction 係数に関連する値であると考えられる。これらより一周期の岸向き、沖向きの漂砂量 Q_n , Q_f は各々次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Q_n &= B_n + S_{n1} + S'_{n3} = B_n + S_{n1} + \kappa_n S_{n1} \\ Q_f &= B_f + S_{f1} + S'_{f3} = B_f + S_{f1} + \kappa_f S_{f1} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} S_{n1} &= (\varepsilon \cdot B_f + q_{vf}) (1 - k_n) \\ S_{f1} &= (\varepsilon \cdot B_n + q_{vn}) (1 - k_f) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで、 B_n , B_f : 岸、沖向きの掃流砂量、 q_{vn} , q_{vf} : 岸、沖側斜面より渦が巻き上げる砂の量、 k_n , k_f : 岸、沖の浮遊砂雲中の砂粒子が減少する割合、 κ_n , κ_f : 浮遊砂雲が砂漣一波長越えて輸送される割合、 q_{vn} , q_{vf} , k_n , k_f の算定方法は別報⁹⁾参照。

(3) 浮遊砂雲の輸送割合 (κ_n , κ_f)

著者らはすでに砂漣上の砂粒子運動の数値シミュレーションを行ない κ_n , κ_f を推算しているが、さらに詳細な実験をもとにしたシミュレーションを行った。浮遊砂粒子の運動方程式は既報⁷⁾と同じである。水平位置 X 、鉛直位置 Y とすると

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 X}{dt^2} - g \cdot \left(U - \frac{dX}{dt} \right) / w_0 &= 0 \\ \frac{d^2 Y}{dt^2} + g + g \frac{dY}{dt} / w_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

ここで、 U : 砂漣形状を考慮した写像関数を用いた流速、 w_0 : ストークス則に基く沈降速度である。(3) 式には、水流の乱れの効果が入っていない。そこで数値積分する際に各時間ごとに正規乱数を用いて粒子の拡散効果を表わした。つまり

$$\left. \begin{aligned} X(t+\Delta t) &= X(t) + \Delta X + C \cdot R_a \\ Y(t+\Delta t) &= Y(t) + \Delta Y + C \cdot R_a \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

ここで、 C : 定数、乱数 R_a は平均値 0、標準偏差 1 の正規乱数である。定数 C は各時間ごとの浮遊砂粒子群の分散が、次式のように表わされるので、粒子群の σ_{xx} , σ_{yy}

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_{xx}/dt &= C^2 \cdot R_a^2 / \Delta t \\ d\sigma_{yy}/dt &= C^2 \cdot R_a^2 / \Delta t \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

の3倍が浮遊砂雲縁部の等価円直径 R に等しいと仮定することにより定数 C を求めた。すなわち

$$C = \left\{ \frac{4}{9 \cdot R_a^2} \cdot \Delta t \cdot \frac{dR^2}{dt} \right\}^{1/2} \dots (6)$$

となる。

計算においては、砂漣頂に浮遊砂雲の形状を長方形と仮定したものを設定し、そこに 81 個の砂を配置した。浮遊砂雲の大きさは、既報にならって高さ (1.8 η)、横 (0.5 λ) を用いた。しかし、砂漣上で形成される浮遊砂雲の大きさは、流速や砂漣形状などにより異なるために、岸、沖向きの最大流速の比を用いて求めた。つまり渦の

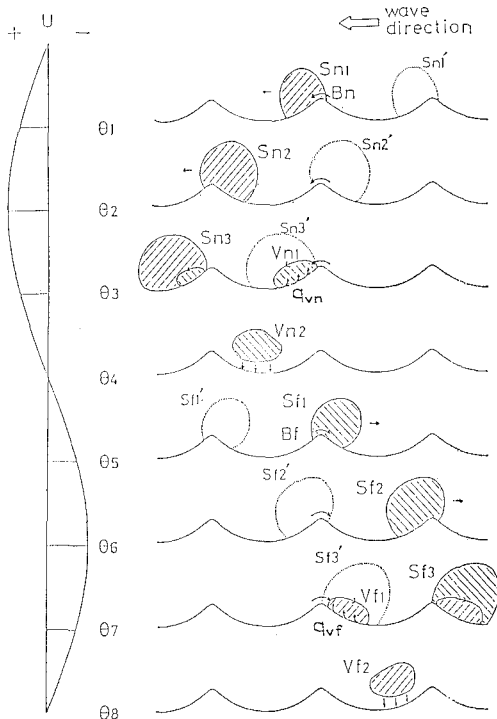


図-2 砂漣上の砂移動模式図

発生に起因する無次元量として、レイノルズ数、ストローハル数を考え、普通のレイノルズ数の範囲では、ストローハル数はほぼ 0.2⁹⁾ であることがわかっている。また渦は流速が極値の時に発生すると言われている¹⁰⁾。これらより渦が発生するに要する流速 U_v を求めて、 $W = S_{f1}/S_{m1}$ を求めた。

$$W = (\hat{U}_f - U_v) / (\hat{U}_n - U_v) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\hat{U}_n$, $\hat{U}_f$: 岸、沖向きの最大流速、よって、 S_{n1} , S_{f1} の大きさは、 $(1.8 \cdot \eta \cdot W \times 0.5 \cdot \eta \cdot W)$, $(1.8 \eta \times 0.5 \lambda)$ で表わせる。図-3 から、この考えがほぼ妥当であることが言える。

以上これらを用いて、Runge-Kutta-Gill 法で計算を行った。図-4 に計算の一例を示す。

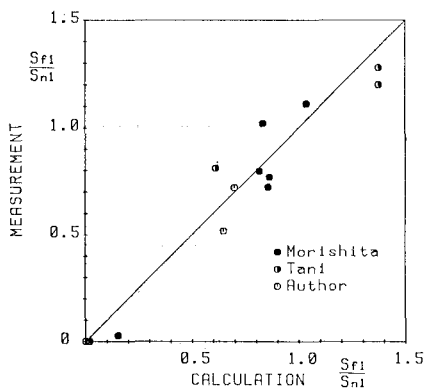


図-3 岸向き、沖向き浮遊砂雲の大きさ

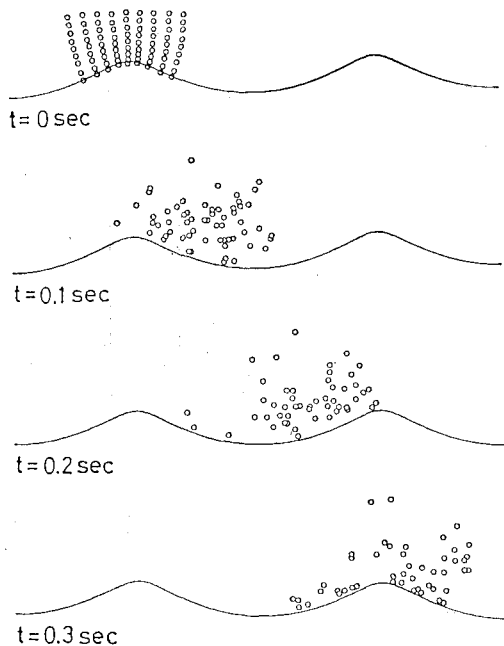


図-4 浮遊砂雲の推定 (Case 1)

(4) 砂鏈上の掃流砂量

砂鏈上の掃流砂量は、砂鏈頂部と谷部の流速値を用いた場合異なってくることが予想される。そこで砂鏈谷部から頂部までの各点で掃流砂量を求め、その平均値が真の砂鏈上の掃流砂量に等しいと仮定した。沢本、山下³⁾の考えに基づき、各時間の砂粒子の移動距離、移動確率を求め、それらの積を半周期積分した値が掃流砂量に相当するとして図-5を得た。横軸は砂鏈谷部からの距離、縦軸は砂鏈各点での半周期間の掃流砂量を示す。

分布形の平均位置(図-5中の破線)の掃流砂量が斜面上の全掃流砂量を代表すると考えた。その点は砂鏈頂部より 0.18 λ となった。その位置における流速の加速係数、砂鏈勾配を考慮して流速の水平成分を求めた。この流速値を土屋が用いた Kalinske-Brown の式に代入して砂鏈上の掃流砂量を求めた。

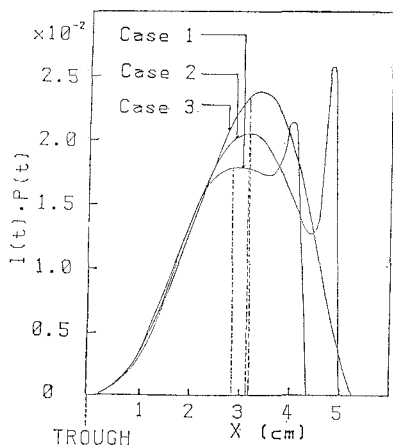


図-5 砂鏈上の掃流砂量

4. 結 果

(1) κ_n , κ_f について

κ_n , κ_f の数値シミュレーションにより得られた値を表-2に示す。この値の検証を図-1で示した人工砂鏈で行った。人工砂鏈中央部に同じ形状の砂鏈を砂で作成し、波を数波作用させて、岸、沖側に設けられた各 sand trap に堆積した砂を採取する。図-6に結果の一部を示す。縦軸は、3本の trap の平均値より求めた一周期平均の単位面積当りの堆砂量 (g/cm²) である。この実験では一波長を越えて輸送される砂の量はわかるが、渦が形成さ

表-2 κ_n , κ_f の結果の比較

Case No.	計算結果		実験結果		濃度分布	
	κ_n	κ_f	κ_n	κ_f	κ_n	κ_f
1	0.519	0.457	0.459	0.447	0.492	0.467
2	0.395	0.395	0.423	0.400	0.419	0.405
3	0	0.420	0.130	0.403	0	0.451

Case 2

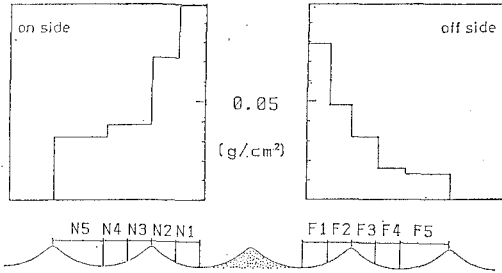


図-6 浮遊砂雲の沈降分布

れた直後の浮遊砂雲が不明であるが、堆積した砂量を浮遊砂雲中の砂にはほぼ等しいと考えた。また砂漣上の浮遊砂濃度分布からも κ_n , κ_f の値の推定を行なった。その結果も表-2に示す。Case 2の κ_n は浮遊砂雲が認められなかったため0とした。計算で求めた κ_n , κ_f はほぼ妥当な値であることがわかった。

(2) κ_n , κ_f , q_{vn} , q_{vf} について

これらの値を実験的に測定することは極めて困難であり、信頼性に欠ける。ただ砂漣上の浮遊砂濃度分布を各位相ごとに調べるにより推定できる。渦による砂の巻き上げ量については、著者らの考え方で求めた結果、これらの量は他の移動量に比べて微小であることがわかった。

(3) 漂砂量について

(1), (2) より, κ_n , κ_f , q_{vn} , q_{vf} は微小であるために、無視すれば、岸向き、沖向きの漂砂量は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Q_n &= B_n + (1 + \kappa_n) \epsilon \cdot B_f \\ Q_f &= B_f + (1 + \kappa_f) \epsilon \cdot B_n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となり、一周期平均の正味の漂砂量は

$$Q_{net} = \epsilon \cdot B_n \cdot \left\{ \frac{(1-r)}{\epsilon} + (1 + \kappa_n) \cdot r - (1 + \kappa_f) \right\} \dots (9)$$

ここで、 $r = B_f/B_n$ 、掃流砂を取り込む割合 ϵ については未だ詳細な検討はなされていないので $\epsilon = 1$ とした。計算値と著者らの実験値の比較を図-7に示す。岸向き、沖向き共に移動方向が一致し、移動量も良い結果が得られている。

(4) 漂砂量公式の検討

(9) 式を任意の波浪、底質の条件で計算するためには掃流砂量は Shields 数を用いた式で求めることができる。しかし、 κ_n , κ_f については数値計算が必要なために、無次元パラメーターを用いて表わすことを試みた。図-8に κ_n/κ_f と Ursell 数の関係を示す。図中 $\kappa_n/\kappa_f > 1$ と $\kappa_n/\kappa_f < 1$ において2つの関係がみられる。これらより net の無次元漂砂量 $\phi_{net}/w_0 \cdot d$ は ϕ と Ursell 数 (U_r) をパラメーターとして表すことができる。しかし計算の結果、 $U_r < 100$ では ϕ_{net} は U_r の変化に対して極めて鈍

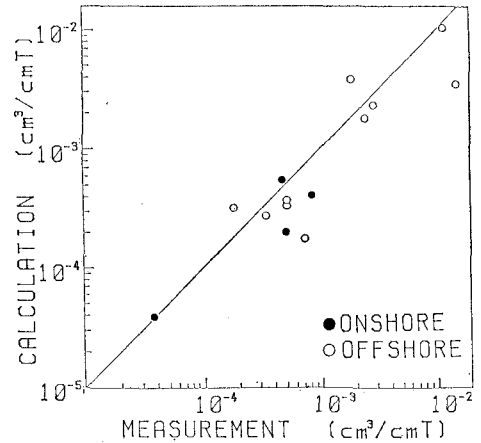
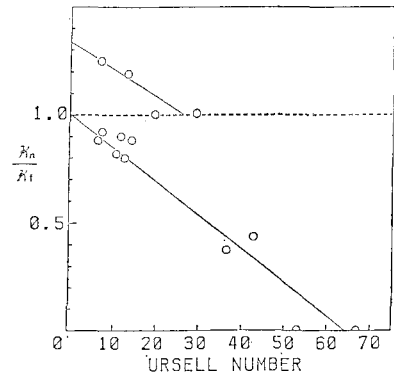
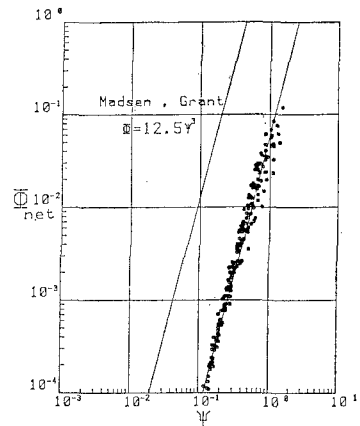


図-7 正味の漂砂量の計算値と実験値

図-8 κ_n/κ_f と Ursell 数の関係図-9 ϕ_{net} と ϕ の関係

感であることがわかった。よって図-9に得られた ϕ_{net} と ϕ の関係を示す。図中の点は任意の波浪条件で(9)式を計算し無次元化した値であり、 $\phi = 12.5\phi^3$ は Madsen-Grant の半周期間の無次元漂砂量の式である。

5. 結 語

本研究では通常の波浪では海底に常に形成されている

砂漣上の net の漂砂量の理論的検討を行った. net の岸沖漂砂量の表示式 (9) 式で求めた値は移動量, 移動方向とも実験値をよく表わしている. ϕ , U_r で無次元化すると $\phi_{net}=f(\phi, U_r)$ となる. 計算の結果, U_r の影響が小さいことが認められ, Madsen-Grant 型の $\phi \propto \phi^3$ と同じ関数型となり, 砂漣上の net の漂砂量を無次元化した値 ϕ_{net} が ϕ の 3 乗に比例することを理論的に導くことができた. $\phi=1$ 付近になると図中の直線に計算値が乗らなくなっているが, $\phi>1$ ではシートフローの状態で砂粒子が移動していると考えられるからである.

Madsen-Grant の式と本研究の式との異なる要因として, 前者は砂粒子の移動の形態を考慮せずに, 半周期間の漂砂量であり, 後者は砂漣上の掃流砂と浮遊砂を考慮した net の漂砂量であると考えられる.

本研究は文部省科学研究費補助金 (自然災害特別研究) の援助の下に行ったものである.

参 考 文 献

- 1) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1093~1112, 1976.
- 2) 野田英明・松原雄平: 岸沖向き漂砂に関する研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 197~201, 1980.
- 3) 沢本正樹・山下俊彦: 波による半周期漂砂量, 土木学会論文集, Vol. 363-II, pp. 195~204, 1985.
- 4) Shibayama, T. and K. Horikawa: Sediment-transport and beach transformation, Proc. 18th Conf. on Coastal Eng., pp. 1439~1458, 1982.
- 5) Nielsen, P., I. A. Svendsen and C. Staub: Onshore-offshore sediment movement on a beach. Proc. 16th Conf. on Coastal Eng., pp. 1475~1492, 1978.
- 6) 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司: 非対称砂漣上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 250~254, 1978.
- 7) 早川典生・多仁正芳・涌井正樹: 砂漣上の砂移動機構と岸沖漂砂量公式の検討, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 288~292, 1985.
- 8) Tsujimoto, G. and N. Hayakawa: Modelling of onshore-offshore sediment transport mechanism under the presence of vortical motion, Coastal Eng. in Japan, Vol. 29, pp. 141~149, 1986.
- 9) 日野幹雄: 流体力学, 朝倉出版.
- 10) 森下憲治: 修士論文, 長岡技術科学大学, 1984.
- 11) Tsuchiya, Y.: A law for sediment transport by waves in a bed load, Coastal Eng. in Japan, Vol. 29, pp. 129~139, 1986.